نشریهٔ مهندسی عمران فردوسی DOI: 10.22067/civil.v31i1.54864 سال سی و یک، شمارهٔ یک، ۱۳۹۷

بررسی آزمایشگاهی رفتار خمشی و ضربه‌ای دال‌های بتنی الیافی انعطاف‌پذیر*

محمد کرمی(۱) محمد کاظم شربتدار(۲)

چکیده *ویژگی‌های نمونه‌های بتنی الیافی PVA و PP تحت آزمایش سقوط ضربه و استاتیکی خمشی با پنجاه و شش نمونه پانل مسلح با الیاف در این مقاله بررسی شده‌اند که نتایج همگی حاکی از افزایش قابل‌توجه پارامترهای مؤثر در ضربه، اعم از مقاومت ضربه‌ای و میزان جذب انرژی می‌باشد. افزایش ۵۰ درصدی الیاف PVA منجر به افزایش ٥٤ درصد نیرو و افزایش دو برابری در میزان جذب انرژی می‌شود و نیروی در نمونهٔ PVA با ۳٪ الیاف، ۸۷ درصد بیش از نیرو در نمونهٔ PP با مقدار الیاف مشابه است. مقاومت ضربه‌ای نمونه‌های دارای الیاف PVA تقریبا سه‌برابر نمونه‌های دارای الیاف PP به‌دست آمده است.*

واژه‌های کلیدی بتن الیافی انعطاف‌پذیر، مقاومت ضربه، جذب انرژی، الیاف PVA ، مقاومت خمشی.

Experimental Investigation of Flexural and Impact Behaviour of Flexible FRC Slabs

M. Karami M.K. Sharbatdar

Abstract *The characteristics of PP and PVA FRC specimens under impact and flexural tests with totally 56 specimens were investigated in this paper. The test results indicated that effective parameters of impact were significantly increased and the specimen behavior were improved. The strength and energy absorption of rectangular specimens were respectively increased by 54 and 200% when the PVA fiber percentage was twice. Final strength PVA specimen with 3% fiber was 87% higher that of PP specimen with same fiber percentage. The impact strength of specimens reinforced with PVA fiber was three times of same specimen reinforced with PP fiber.*

Key Words Flexible FRC concrete, Impact strength, Energy absorption, PVA fiber, Flexural capacity.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۱/۱۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۵/۱۱/۹ می‌باشد.

(۱) دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه سمنان.

(۲) نویسندهٔ مسئول: دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

Email: msharbatdar@semnan.ac.ir

مقدمه

برخی از سازه‌ها مانند سازه‌های دریایی، انبارهای تسلیحاتی و تجهیزات هسته‌ای، نیاز به محافظتی ویژه دربرابر بارهای شدید تصادفی و ضربه‌ای احتمالی دارند. رفتار سازه‌ها تحت بار ضربه‌ای خیلی پیچیده‌تر از رفتار آنها تحت بار استاتیکی است، درحالی‌که بارهای دینامیکی شدید به‌صورتی ویژه سازه را تحت گسیختگی قرار می‌دهند. پیشرفت مهندسی عمران امکان استفاده از مصالح ساختمانی نوین بتنی الیافی با مقاومت، طاقت، قابلیت جذب انرژی و دوام بیشتر را فراهم نموده است که می‌تواند در سازه‌های استراتژیک تحت بارهای ضربه مورد استفاده قرار گیرد در حالیکه بتن معمولی دارای ضعف دربرابر بارهای شدید دینامیکی به‌دلیل عدم تحمل نیروهای کششی زیاد می‌باشد [3، 2، 1]. با ترکیبات سیمانی اصلاح‌شدۀ بتنی با انواع الیاف، مقاومت کششی، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، مقاومت دربرابر ترک‌خوردگی، کنترل ترک، دوام، خستگی، مقاومت دربرابر ضربه و سایش، جمع‌شدگی، انبساط، ویژگی‌های حرارتی و مقاومت دربرابر آتش‌سوزی بتن الیافی (FRC) بهبود می‌یابد. آزمایش‌های زیادی که برروی دال‌های بتنی انجام شده است، نشان از تأثیر بسیار زیاد الیاف در افزایش مقاومت ضربۀ این دال‌های بتنی الیافی می‌باشد [4، 5، 6، 7]. خواص بتن الیافی مانند فولادی وابسته به مشخصات الیاف (درصد حجمی، مقاومت، مدول الاستیسیته و پارامتر چسبندگی الیاف)، مشخصات بتن (مقاومت، نوع مصالح) و مشخصات سطح مشترک الیاف و بتن می‌باشد. یکی از الیاف پلیمری که افزودن آن به بتن منجر به افزایش مشخصه‌های مکانیکی بتن می‌گردد، الیاف پلی‌وینیل الکل PVA می‌باشد. افزودن این الیاف به بتن، با ایجاد ترک‌های ریز مضاعف در حین بارگذاری شکل‌پذیری آن را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد و ترکیبات سیمانی مهندسی ECC از خود رفتار سخت‌شدگی کرنش نشان می‌دهد [۸]. منحنی تنش–کرنش کششی بتن ECC همانند منحنی تنش– کرنش فلزات شکل‌پذیر می‌باشد که در آن نقطۀ تسلیم و رفتار سخت‌شدگی کرنش دیده می‌شود. الیاف PVA درمقایسه با دیگر الیاف آلی از مقاومت کششی و مدول ارتجاعی بالایی برخوردارند و مقاومت بسیار بالا منجر به پیوستگی این الیاف با خمیر سیمان و دوام بالا می‌شود [9، 10، 11]. ترکیبات سیمانی مرکب ECC مقاومت بالایی دربرابر ترک‌خوردن دارند که متعاقبا منجر به افزایش دوام دربرابر یخ‌زدن و آب‌شدن و همچنین کاهش خوردگی میلگردها در نواحی در معرض حملات شیمیایی و افزایش مقاومت دربرابر سایش و خستگی می‌گردد [12، 13]. الیاف پروپیلن به‌منظور کنترل ترک در اثر تغییرات حجمی ناشی از انقباض و انبساط و تنش‌های حرارتی و نیز درجهت افزایش مقاومت کششی، نرمی، قابلیت جذب انرژی و فراهم‌آوری یک سیستم یکپارچه در آزمایش‌های ضربه استفاده می‌شوند. آزمایش‌های زیادی در مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی برای مطالعۀ رفتار سازه‌های هدف بتنی تحت بار ضربه انجام شده است که منجر به ارائۀ فرمول‌های تجربی و مدل‌های تحلیلی زیادی برای پیش‌بینی اثرهای تخریبی این پدیده گردیده است [14]. مطالعۀ رفتار سازه‌های بتنی تحت بارگذاری ضربه‌ای به‌صورت آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی توسط محققان گوناگونی انجام شده است. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که در بارگذاری ضربه‌ای به سازۀ هدف بتنی، در حالت کلی هفت پدیده قابل مشاهده است که عبارتند از نفوذ، ترک‌خوردگی و بیرون‌زدگی مخروطی، پوسته‌شدن، ترک‌خوردگی شعاعی، قلوه‌کن شدن، عبور پرتابه از میان سازه، پاسخ و گسیختگی کلی سازه [15]. از این هفت پدیده، پوسته‌شدن، نفوذ، قلوه‌کن شدن، بیرون‌زدگی و عبور به‌عنوان اثرهای موضعی برخورد (ضربه) شناخته می‌شوند. چهار پارامتر عمق نفوذ، حد قلوه‌کن شدن، حد عبور، و حد تخریبی در ارزیابی این اثرهای موضعی قابل محاسبه هستند. روش‌های متعددی برای شبیه‌سازی رفتار بتن تحت بار ضربه‌ای و انفجار به‌کار گرفته شده است که از آن جمله می‌توان به‌روش تفاضل محدود (FDM)،

روش اجزای محدود (FEM) و روش‌های بدون مش (MFM) مانند هیدرودینامیک اجزای محدود (SPH) اشاره نمود. برای بررسی پاسخ دینامیکی سازه‌ها دربرابر بارگذاری انفجاری، روش اویلر و روش لاگرانژ نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. نرم‌افزارهای متعددی برای مدل‌سازی رفتار سازه‌ها تحت بار ضربه و انفجار به‌کار رفته است که از آن جمله می‌توان به ANSYS، ABAQUS، LS-DYNA و AUTODYN اشاره نمود [16, 17].

به‌صورت کلی، مقاومت ضربه‌ای بتن FRC با اندازه‌گیری یکی از پارامترهای انرژی صرف‌شده برای گسیختگی بتن الیافی، تعداد ضربه در آزمایش ضربات تکرارشونده، اندازه یا میزان تخریب یا اندازه و سرعت قطعات متلاشی‌شدهٔ آزمونهٔ تحت ضربه یا انفجار تعیین می‌شود. ساده‌ترین روش آزمایش ضربه، ضربات تکرارشونده در آزمایش سقوط وزنه می‌باشد. به‌طور کلی و براساس توصیه‌نامهٔ ACI-544.2R آزمایش‌های ضربهٔ بتن الیافی به انواع مختلف مانند آزمایش ضربهٔ پاندول، آزمایش ضربهٔ سقوط وزنه (تک‌ضربه‌ای یا ضربات تکرارشونده)، آزمایش با آهنگ کرنش ثابت، آزمایش ضربهٔ نفوذگر (پرتابه)، آزمایش میلهٔ هاپکینسون، آزمایش انفجار، و آزمایش ضربهٔ پاندول مجهزشده تقسیم می‌گردد که انجام هر یک به شرایط خاص مسئله بستگی خواهد داشت. این نتایج به محاسبهٔ مشخصات اساسی مصالح شامل مقاومت خمشی، مقاومت کششی، ظرفیت جذب انرژی و رفتار بار- تغییرمکان در آهنگ کرنش متفاوت می‌انجامد [18]. تعداد قابل‌توجهی از آزمایش‌های ضربهٔ دال‌های بتنی و بتن الیافی در دانشگاه UBC کانادا با سه دستگاه بزرگ با وزنهٔ ۵۷۸ کیلوگرمی و ارتفاع سقوطی بیشینه ۲/۵ متر و دستگاه متوسط با وزنهٔ ۶۰ کیلوگرم و ارتفاع بیشینهٔ ۲/۵ متر و دستگاه کوچک با وزنهٔ ۱۲ کیلوگرم و ارتفاع بیشینهٔ ۱/۲ متر انجام گرفت [17، 19، 20]. آزمایش‌های زیادی برای مطالعهٔ رفتار المان‌های بتنی تحت بارگذاری ضربه انجام گرفته است که این روش‌ها به‌ویژه برای بتن الیافی مورد توجه بوده است [21]. این آزمایش‌ها را به سه دستهٔ کیفی، نیمه‌کیفی و کمی تقسیم‌بندی می‌کنند که براساس اطلاعات ثبت‌شده حاصل از آزمایش می‌باشد و باتوجه به امکانات موجود انتخاب می‌شوند. آزمایش سقوط وزنهٔ ساده از نوع کیفی و نیمه‌کیفی است و متداول‌ترین آزمایش ضربه برای بتن الیافی می‌باشد. در این آزمایش پارامترهایی چون انرژی صرف‌شده، تعداد ضربه برای ایجاد سطح مشخص از گسیختگی، الگو و میزان تخریب و سرعت و اندازهٔ قطعات قلوه‌کن‌شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. آزمایش‌های ضربهٔ بتن الیافی که در ACI-544 معرفی شده‌اند، علی‌رغم کاربردهای زیاد، خالی از اشکال نیستند و به‌ویژه درخصوص پارامترهای آماری باید مورد ارزیابی بیشتر و اصلاح قرار گیرند.

نمونه‌های آزمایشگاهی

در تحقیق حاضر به‌دلیل مشخصه‌های مطلوب الیاف پلیمری پلی وینیل الکل (PVA) و پلی پروپیلن (PP) اعم از چگالی کمتر، سازگاری با محیط زیست، مقاومت کششی مناسب، خصوصیات عایق بودن و مشخصات مکانیکی دیگر (مطابق جداول ۱ و ۲)، نمونه‌های بتنی ساخته‌شده با این الیاف مورد بررسی قرار گرفته است. میزان الیاف مصرفی در مخلوط بتن به کاربردهای آن المان مانند جمع‌شدگی در بتن بستگی دارد. به‌منظور بررسی ویژگی‌های بتن‌های الیافی ساخته‌شده با الیاف PVA و PP، پنجاه و شش نمونه پانل با ابعاد و ضخامت‌های مشخص ساخته شد که این نمونه‌ها تحت آزمایش ضربهٔ سقوط وزنه و بارگذاری استاتیکی قرار گرفت. در این بخش مشخصات مصالح و نمونه‌های آزمایشگاهی ارائه خواهد شد. مشخصات مصالح جامد و مایع استفاده شده در آزمایش در شکل (۱) نمایش داده شده است.

جدول ۱ مشخصات الیاف پلی وینیل الکل PVA

نوع الیاف	طول (mm)	قطر (میکرون)	چگالی	مقاومت کششی (MPa)	مدول کششی (MPa)
PVA	12	40	1.3	1600	40

جدول ۲ مشخصات الیاف پلی پروپیلن PP

نوع الیاف	طول (mm)	چگالی	مقاومت کششی (MPa)	مدول کششی (MPa)
PP	12	0.91	600	5



شکل ۱ مصالح جامد طرح اختلاط

سیمان مورد استفاده نوع I ردهٔ مقاومتی kg/cm^2 ۴۲۵ بوده است. باتوجه به طرح اختلاط و مشخصات بتن‌های با پایهٔ سیمانی، از سنگ‌دانه‌های سیلیسی با حداکثر قطر ۱ میلی‌متر استفاده شده است. آب مصرفی در ساخت نمونه‌ها، آب شرب شهری می‌باشد. برای کاهش نسبت آب به سیمان و دستیابی به کارایی لازم از فوق روان‌کننده با پایهٔ پلی‌کربوکسیلیک، Glenium ACE303P، با نام تجاری ژلنیوم ۳۰۳ برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. باتوجه به تأثیر مثبت خاکستر بادی در کارایی و دوام بتن، از این نوع مصالح به‌عنوان مصالح سیمانی به‌همراه سیمان استفاده شده است. طرح‌های اختلاط بتن‌های الیافی برمبنای مشخصات کلی بتن‌های الیافی توانمند و بتن‌های پایه‌سیمانی مورد طراحی قرار گرفته است. برای کنترل، نمونه‌های بتنی ساده با طرح‌های مذکور (بدون الیاف) ساخته شده و نتایج مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است. نسبت‌های اختلاط و مشخصات کلی طرح در جدول (۳) ارائه شده است. در این جدول، CM ترکیب سیمان و خاکستر بادی و S ماسه است.

آزمایش ضربهٔ بتن الیافی براساس توصیه‌نامهٔ ACI-544.2R ، عموما برروی آزمونه‌های دیسکی شکل (به‌قطر ۱۵ و ضخامت ٦ سانتی‌متر) تحت بار ضربه قرار می‌گیرد. نحوهٔ انجام آزمایش بدین صورت است که یک چکش به وزن تقریبی ٤/٥ کیلوگرم از ارتفاع ۰/۵ متری به‌طور متناوب برروی گوی فولادی سخت به‌قطر ٦٣/٥ میلی‌متر (که در مرکز دایرهٔ سطح بالایی نمونه استوانه قرار دارد) رها می‌شود. در برخی از مطالعات آزمایشگاهی، بار ضربه برروی یک پانل بتن الیافی اعمال شده است که نسبت طول و عرض به ضخامت آن قابل‌توجه است و می‌تواند مدلی برای دال یا پوسته کامپوزیتی باشد. در این تحقیق باتوجه به‌عنوان و هدف تحقیق، پانل‌های مربعی‌شکل به طول و عرض ۳۰ سانتی‌متر و ضخامت ۲/۳ و ٤ سانتی‌متر طراحی و ساخته شده است. کلیهٔ نمونه‌های ساخته‌شده برای آزمایش‌های ضربه و استاتیکی طبق ضخامت و الیاف مصرفی شماره‌گذاری شده‌اند که در جدول (٤) مشخصات آن ارائه شده است. به‌منظور بررسی و آنالیز بهتر نتایج، نمونه‌های مستطیلی به عرض ۱۵ سانتی‌متر و طول کل ٦۰ سانتی‌متر نیز ساخته شدند و تحت آزمایش بارگذاری استاتیکی قرار گرفتند که نتایج آنها در ادامه ارائه می‌گردد. ۱۰ نمونهٔ استوانه‌ای ۱۰۰ میلی‌متری و ۱۵ نمونهٔ مکعبی ۵۰ میلی‌متری برای به‌دست آوردن مقاومت فشاری بتن‌های الیافی مورد نظر ساخته شدند و مورد آزمایش قرار گرفتند که مشخصات آنها در جدول (۵) ارائه شده است. برای ساخت بتن مورد نظر، ابتدا مصالح خشک نظیر سیمان، خاکستر بادی و سن‌گدانه‌ها به‌مدت ۳۰ ثانیه در هم‌زن مخلوط می‌شوند. سپس مصالح مایع شامل آب و فوق روان‌کننده (که از قبل وزن‌کشی و مخلوط شده‌اند) به‌صورت تدریجی به بخش جامد اضافه می‌شوند و مخلوط‌نمودن به‌مدت ۲ دقیقه ادامه می‌یابد. سپس با اضافه کردن الیاف به‌مدت ۵ دقیقهٔ دیگر مخلوط به‌هم زده می‌شود تا مخلوط موردنظر برای ریختن در قالب به‌دست آید. در زمان افزودن الیاف به مخلوط بایستی دقت نمود که توزیع الیاف به‌نحو مطلوبی صورت

پذیرد. شایان ذکر است که افزودن الیاف به مخلوط بتن می‌تواند بعد یا در حین اختلاط به مخلوط اضافه گردد. باتوجه به نسبت آب به سیمان (W/C) کم و برای دست‌یابی به عملکرد کامل فوق روان‌کننده لازم است از حالت سریع در هم زدن بتن استفاده گردد. در این مرحله ابتدا سطوح داخلی قالب با روغن آغشته می‌گردد و سپس بتن‌ریزی انجام می‌گیرد. برای ایجاد همگنی در نمونه‌ها از میز لرزان در مرحلهٔ ساخت استفاده می‌شود. البته احتمال ترک‌خوردگی‌های سطحی وجود دارد که وجود الیاف در بتن تا حد زیادی از بروز این نوع ترک‌خوردگی ممانعت می‌کند. درعین‌حال برای حذف کامل ریزترک‌ها، روی آزمونه‌های بتنی از زمان اتمام ساخت تا باز کردن قالب با نایلون پوشانده می‌شود تا از تبخیر سطحی نمونه‌ها جلوگیری شود. پس از گذشت زمان تقریبی ۲۴ ساعت از ساخت نمونه‌ها، قالب باز می‌شود و پانل‌های بتنی به‌مدت ۲۸ روز برای عمل‌آوری، در آب با دمای محیط (۳۵ درجه) قرار می‌گیرند.

جدول ۳ نسبت‌های اختلاط و مشخصات کلی طرح

مصالح	نوع	وزن در متر مکعب (kg)
سیمان C	نوع I	561
خاکستر بادی FA	-	673
سنگدانه S	سیلیسی	449
آب W	-	327
W/C	-	0.58
W/CM	-	0.26
FA/C	-	1.2
S/C	-	0.8
فوق روان کننده	پلی‌کربوکسیلیک	14

جدول ٤ پانل‌های آزمایشگاهی و طرح اختلاط‌های مربوط

نمایه	سیمان (kg/m^3)	خاکستر بادی (kg/m^3)	سنگدانه (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	فوق روان کننده (kg/m^3)	نوع الیاف	درصد حجمی الیاف (%)	وزن الیاف (kg/m^3)	طول الیاف (mm)	ابعاد نمونه ها (mm)	ضخامت پانل	زمان عمل آوری (روز)	دمای عمل آوری	تعداد نمونه ها
A-1	561	673	449	327	14	PVA	2	26	12	300x300	23	28	35	4
A-2	561	673	449	327	14	PVA	2	26	12	300x300	40	28	35	4
D-1	561	673	449	327	14	PVA	3	39	12	300x300	23	28	35	4
D-2	561	673	449	327	14	PVA	3	39	12	300x300	40	28	35	4
A-1-REC	561	673	449	327	14	PVA	2	26	12	650x150	23	28	35	4
A-2-REC	561	673	449	327	14	PVA	2	26	12	650x150	40	28	35	2
D-1-REC	561	673	449	327	14	PVA	3	39	12	650x150	23	28	35	2
D-2-REC	561	673	449	327	14	PVA	3	39	12	650x150	40	28	35	2
E-1	561	673	449	327	14	PP	2	18.2	12	300x300	23	28	35	2
E-2	561	673	449	327	14	PP	2	18.2	12	300x300	40	28	35	4
B-1	561	673	449	327	14	PP	3	27.3	12	300x300	23	28	35	4
B-2	561	673	449	327	14	PP	3	27.3	12	300x300	40	28	35	4
E-1-REC	561	673	449	327	14	PP	2	18.2	12	650x150	23	28	35	4
E-2-REC	561	673	449	327	14	PP	2	18.2	12	650x150	40	28	35	4
B-1-REC	561	673	449	327	14	PP	3	27.3	12	650x150	23	28	35	2
B-2-REC	561	673	449	327	14	PP	3	27.3	12	650x150	40	28	35	2
C-1	561	673	449	327	14	بدون الیاف	-	-		300x300	23	28	35	4
C-2	561	673	449	327	14	بدون الیاف	-	-		300x300	40	28	35	4

جدول ۵ نمونه‌های استوانه‌ای و طرح اختلاط‌های مربوط

نمایه	سیمان(kg/m^3)	خاکستر بادی(kg/m^3)	سنگدانه(kg/m^3)	آب(kg/m^3)	فوق روان کننده(kg/m^3)	نوع الیاف	درصد حجمی الیاف(%)	وزن الیاف(kg/m^3)	طول الیاف(mm)	ابعاد نمونه ها(mm)	زمان عمل آوری (روز)	دمای عمل آوری	تعداد نمونه ها
A	561	673	449	327	14	PVA	2	26	12	100x200	28	35	2
D	561	673	449	327	14	PVA	3	39	12	100x200	28	35	2
E	561	673	449	327	14	PP	2	18.2	12	100x200	28	35	2
B	561	673	449	327	14	PP	3	27.3	12	100x200	28	35	2
C	561	673	449	327	14	بدون الیاف	-	-	-	100x200	28	35	2
A	561	673	449	327	14	PVA	2	26	12	50x50	28	35	3
D	561	673	449	327	14	PVA	3	39	12	50x50	28	35	3
E	561	673	449	327	14	PP	2	18.2	12	50x50	28	35	3
B	561	673	449	327	14	PP	3	27.3	12	50x50	28	35	3
C	561	673	449	327	14	بدون الیاف	-	-	-	50x50	28	35	3
مجموع نمونه های فشاری													25

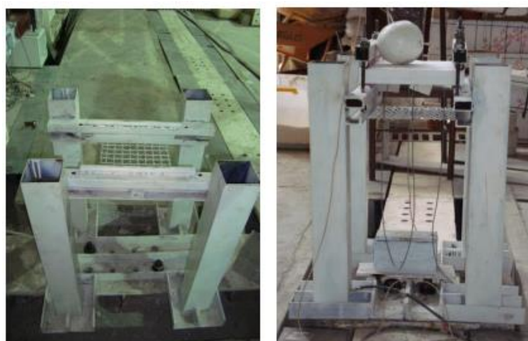
طراحی Set-up آزمایش‌ها

طراحی آزمایش ضربه. آزمایش بارگذاری ضربه‌ای به‌صورت سیستم سقوط وزنه درنظر گرفته شده است. یک وزنه به وزن ۳/۵ کیلوگرم از ارتفاع ٦۵ سانتی‌متری برروی پانل بتنی رها می‌شود. مقدار انرژی وارد بر نمونه‌ها تقریبا برابر است با میزان انرژی ارائه‌شده در آزمایش توصیه‌شده در ACI-544.2R (وزنهٔ ٤/۵ کیلوگرمی که از ارتفاع ۰/۵ متری رها می‌شود). دستگاه سقوط وزنهٔ مورد استفاده در آزمایشگاه ساخته شد و مطابق شکل (۲) ضربه به‌صورت دستی و با کشیدن طناب متصل به وزنه تا ارتفاع مورد نظر عمل می‌کند.

میزان انرژی وارد در هر ضربه باتوجه به فرمول E=mgh برابر 22.32 J می‌باشد. شرایط تکیه‌گاهی متفاوتی در آزمایش‌های ضربه برروی بتن الیافی مشاهده شده است. در انجام این تحقیق شرایط تکیه‌گاهی دو سر مفصل غلتکی بااجازهٔ چرخش درنظر گرفته شده است. برای اعمال شرایط گیرداری، تکیه‌گاهی طراحی و ساخته شد که شامل دو قید زیرین و بالایی می‌باشد که توسط پیچ‌هایی به‌هم محکم می‌شوند و پانل بین آنها قرار می‌گیرد که در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۲ نماهایی از اجزای مختلف سیستم آزمایش ضربه



شکل ۳ جزئیات تکیه‌گاه آزمایش ضربه

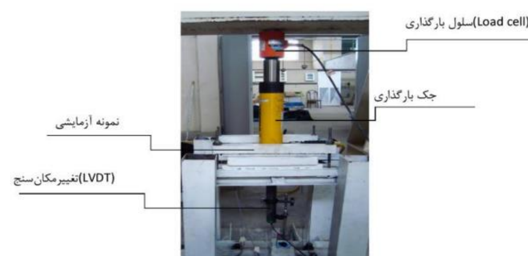
نمونه‌ها پس از آماده شدن، در محل تکیه‌گاه‌ها قرار گرفتند و آزمایش انجام پذیرفت. نتایج حاصل از آزمایش می‌تواند شامل پارامترهای مختلفی باشد که در اینجا باتوجه به امکانات موجود آزمایشگاهی، از دستگاه و

آزمایش سقوط وزنهٔ ساده با ثبت کیفی و شهودی استفاده گردید.

آزمایش بارگذاری استاتیکی. به‌منظور بررسی حداکثر نیروی تحمل‌شده، بار ترک‌خوردگی و میزان جذب انرژی در نمونه‌های ساخته‌شده، آزمایش بارگذاری استاتیکی انجام پذیرفت. به‌گونه‌ای که با قرار دادن نمونه‌ها برروی تکیه‌گاه‌های طراحی‌شده و نصب تغییرمکان‌سنج (LVDT) در زیر و نیز سلول بارگذاری (Load cell) برروی نمونه، بار استاتیکی به‌صورت تدریجی توسط جک اعمال و تغییرمکان‌هایی در نمونه‌ها ایجاد گردید. شرایط تکیه‌گاهی در این آزمایش همانند شرایط تکیه‌گاهی طراحی‌شده برای آزمایش ضربه می‌باشد که در آن دو انتهای نمونه به‌صورت مفصل کامل درنظر گرفته شده است. فرایند بارگذاری و تغییرمکان‌های حاصل توسط دستگاه ثبت دیجیتال نتایج (Data logger) به‌صورت لحظه‌ای ثبت گردید؛ سپس به‌منظور آنالیز نتایج، دیاگرام‌های نیرو برحسب تغییرمکان ترسیم گردید. سیستم‌های آزمایش و ثبت نتایج بارگذاری استاتیکی در شکل (٤) نشان داده شده است.

نتایج آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل

آزمایش ضربه. به‌منظور بررسی رفتار دال‌های بتنی مسلح به الیاف پلی وینیل الکل و پلی پروپیلن تحت آزمایش سقوط وزنه، دوازده نمونه با مشخصات جدول (٦) و با طرح اختلاط مورد نظر ساخته شد. اطلاعاتی که در این آزمایش برای هر طرح اختلاط به‌دست آمده است شامل تعداد ضربات وارد بر پانل برای ایجاد اولین تخریب موضعی، تعداد ضربه برای رسیدن به حد گسیختگی نهایی، و الگوی رفتاری و گسیختگی پانل و نحوهٔ ترک‌ها در هر مرحله از آزمایش ضربه می‌باشد. تصاویر نمونه‌ها در مراحل بارگذاری ضربه، الگوی ترک‌خوردگی و گسیختگی در شکل‌های (٥ – ٧) نشان داده شده است.



شکل ٤ سیستم آزمایش بارگذاری استاتیکی

جدول ٦ مشخصات نمونه‌های مورد آزمایش در تست ضربه

نام نمونه	شرح نمونه	ضخامت (mm)	شکل نمونه	درصد حجمی الیاف (%)	تعداد نمونه
PVA-A1	نمونه بتنی با PVA	2.3	مربعی	2	2
PVA-A2	نمونه بتنی با PVA	4	مربعی	2	2
PP-B1	نمونه بتنی با PP	2.3	مربعی	3	2
PP-B2	نمونه بتنی با PP	4	مربعی	3	2
NC-C1	نمونه بتنی معمولی	2.3	مربعی	-	2
NC-C2	نمونه بتنی معمولی	4	مربعی	-	2
مجموع نمونه ها					12



شکل ۵ وضعیت نمونهٔ NC-C2 در اعمال اولین ضربه



(الف) نمونهٔ دوم PP-B1 پس از اعمال ٤ ضربه



(ب) نمونهٔ دوم PP-B2 پس از اعمال ۵۵ ضربه

شکل ٦ وضعیت نمونه‌های پروپیلن پس از اعمال ضربات



(الف) نمونهٔ PVA-A1 پس از اعمال ٤ ضربات



(ب) نمونهٔ PVA-A2 پس از اعمال ۱۰۰ و ٦۳ ضربه

شکل ۷ وضعیت نمونه‌های PVA پس از اعمال ضربات

همان‌طور که در جداول(۷ تا ۹) مشاهده می‌گردد، نمونه‌های سادهٔ بتنی (فاقد الیاف) با ضخامت ۲٫۳ سانتی‌متر، با اعمال اولین ضربه به‌صورت ترد گسیخته شد لیکن در نمونه‌های با ضخامت مشابه دارای الیاف PP و PVA، پس از اعمال اولین ضربه برروی نمونه‌ها، صرفا ترک‌های ریز محدودی برروی وجه کششی نمونه‌ها ایجاد گردید و گسیختگی کامل نمونه‌های دارای الیاف PVA پس از اعمال چهارمین ضربه حادث گردید. همچنین در نمونه‌های دارای الیاف PP، گسیختگی کامل نمونه‌ها به‌ترتیب پس از وارد آمدن ٤ و ۳ ضربه به نمونه‌های اول و دوم مشاهده گردید. در نمونه‌های با ضخامت بیشتر (٤ سانتی‌متر)، مقاومت ضربه‌ای نمونه‌های الیافی مشهودتر بود؛ به‌طوری‌که در نمونه‌های اول و دوم بتنی مسلح به الیاف PVA، به‌ترتیب پس از اعمال ۱۷ و ۱۹ ضربه، اولین ترک‌ها در وجه کششی نمونه‌ها نمایان گردید و نهایتا تحت ضربات ۱۵٦ و ۱٦۳، گسیخته شدند. از طرفی دیگر، اولین ترک‌ها در نمونه‌های دارای الیاف PP با ضخامت ٤ سانتی‌متر در اثر اولین ضربهٔ واردشده مشاهده گردید. نمونه‌های مذکور پس از وارد آمدن ٤۷ و ۵۵ ضربه به گسیختگی کامل رسیدند. باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده و مقایسهٔ تعداد ضربات در جدول (۷)، مقاومت ضربه‌ای نمونه‌های دارای الیاف PVA تقریبا سه برابر نمونه‌های دارای الیاف PP به‌دست آمده است. همان‌طور که مشاهده گردید، افزودن الیاف به ماتریس

بتن، علاوه‌بر بهبود الگوی ترک‌خوردگی، مقاومت ضربه‌ای نمونه‌ها را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. در آزمایش ضربه به‌دلیل مقاومت بسیار بالای نمونه‌های بتنی ساخته‌شده از الیاف پلی وینیل الکل نتایج چشم‌گیری به‌دست آمد. این نتایج می‌تواند به‌دلیل درگیری مناسب الیاف با ماتریس بتن در حین بارگذاری باشد که در آن سهم باربری الیاف بسیار مشهود بوده و مقاومت ضربه‌ای (تعداد ضربه‌های تحمل‌شده) نمونه‌ها را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داده است. در نمونه‌های بتنی معمولی با اعمال اولین ضربه، نمونه‌ها به‌صورت ترد گسیخته شدند اما در نمونه‌های با ضخامت مشابه دارای الیاف PP و PVA، پس از اعمال اولین ضربه برروی نمونه‌ها، صرفا ترک‌های ریز محدودی برروی وجه کششی نمونه‌ها ایجاد گردید و گسیختگی کامل نمونه‌های دارای الیاف PP و PVA پس از اعمال چندین ضربه حادث گردید.

نتایج آزمایش بارگذاری استاتیکی. به‌منظور بررسی بیشتر رفتار بتن‌های الیافی حاوی الیاف پلی وینیل الکل (PVA) و پلی پروپیلن (PP)، نمونه‌هایی با ابعاد ۳۰ × ۳۰ سانتیمتر با ضخامت‌های ۲,۳ و ٤ سانتی‌متر و تعدادی نمونه‌های مستطیلی ۶۰×۱۵ سانتی‌متری با ضخامت ٤ سانتی‌متر حاوی میزان ۲ و ۳ درصد الیاف PVA و PP ساخته شد و تحت آزمایش بارگذاری استاتیکی قرار گرفت. هدف از انجام این آزمایش بررسی حداکثر نیروی تحمل شده، بار ترک‌خوردگی و میزان جذب انرژی در نمونه‌ها بود. در حین اعمال نیرو و حادث شدن تغییرشکل‌ها در نمونه‌ها، این نتایج توسط دستگاه ثبت دیجیتال (Data logger) ضبط گردید. در این اثنا به‌منظور بررسی کیفی نتایج، مشاهدات حاصل با گرفتن عکس ثبت گردید که در ذیل نتایج حاصل ارائه می‌گردد. در جدول (۸) مشخصات نمونه‌های مورد آزمایش در تست بارگذاری استاتیکی آورده شده است. پس از انجام آزمایش و ثبت نتایج، منحنی بار- تغییرمکان برای نمونه‌ها ترسیم گردیده است. به‌عنوان مثال حداکثر نیروی تحمل‌شده توسط دو نمونه PVA-A1 با دو درصد الیاف PVA و ضخامت ۲,۳ سانتی‌متر به‌ترتیب ۷,۳۱ و ۷,٤ کیلو نیوتن می‌باشد که تطابق خوبی با یکدیگر در شکل (۸) دارند. میزان جذب انرژی در این نمونه‌ها برابر ٤۰ کیلو ژول می‌باشد.

جدول ۷ تعداد ضربات بر پانل‌های الیافی و غیرالیافی

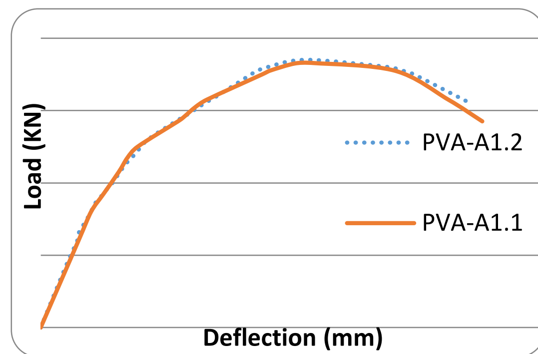
نام نمونه	ابعاد نمونه ها (cm)	اولین ترک خوردگی	گسیختگی نهایی
		ضربه	ضربه
NC-C1-1	30x30x2.3	1	1
NC-C1-2	30x30x2.3	1	1
NC-C2-1	30x30x4	1	1
NC-C2-2	30x30x4	1	1
PP-B1-1	30x30x2.3	1	4
PP-B1-2	30x30x2.3	1	3
PP-B2-1	30x30x4	1	47
PP-B2-2	30x30x4	1	55
PVA-A1-1	30x30x2.3	1	4
PVA-A1-2	30x30x2.3	1	4
PVA-A2-1	30x30x4	17	156
PVA-A2-2	30x30x4	19	163

جدول ۸ نمونه‌های آزمایش‌شده در تست بارگذاری استاتیکی

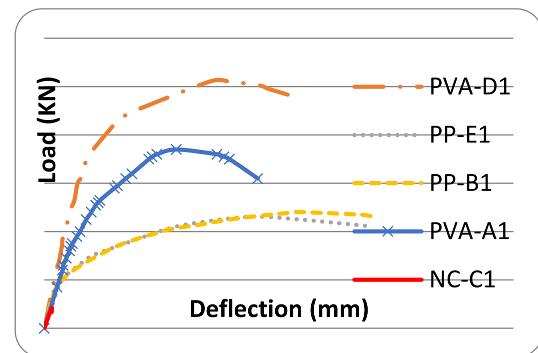
نام نمونه	شرح نمونه	ضخامت (mm)	شکل نمونه	درصد حجمی الیاف (%)	تعداد نمونه
NC-C1	نمونه بتنی معمولی	2.3	مربعی	–	2
NC-C2	نمونه بتنی معمولی	4	مربعی	–	2
PP-E1	نمونه بتنی با PP	2.3	مربعی	2	2
PP-E2	نمونه بتنی با PP	4	مربعی	2	2
PP-B1	نمونه بتنی با PP	2.3	مربعی	3	2
PP-B2	نمونه بتنی با PP	4	مربعی	3	2
PVA-A1	نمونه بتنی با PVA	2.3	مربعی	2	2
PVA-A2	نمونه بتنی با PVA	4	مربعی	2	2
PVA-D1	نمونه بتنی با PVA	2.3	مربعی	3	2
PVA-D2	نمونه بتنی با PVA	4	مربعی	3	2
PP-E2-REC	نمونه بتنی با PP	4	مستطیلی	2	2
PP-B2-REC	نمونه بتنی با PP	4	مستطیلی	3	2
PVA -A2-REC	نمونه بتنی با PVA	4	مستطیلی	2	2
PVA -D2-REC	نمونه بتنی با PVA	4	مستطیلی	3	2
					28

جدول ۹ مقادیر اندیس طاقت نمونه‌های آزمایش‌شده تحت آزمایش بارگذاری استاتیکی

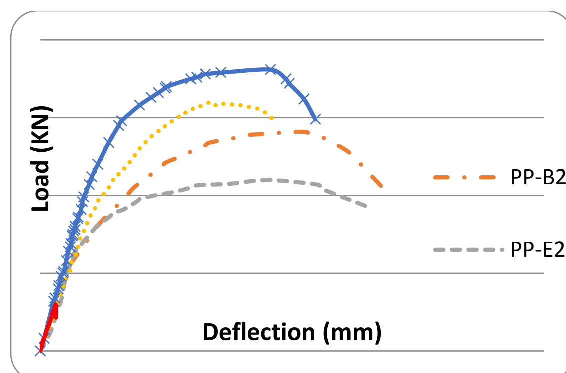
نام نمونه	شرح نمونه	ضخامت (mm)	درصد حجمی الیاف (%)	δ	δ3	δ5.5	δ15.5	I5	I10	I30
PVA-A1	نمونه بتنی با PVA	2.3	2	1.6	10	27	-	6.2	16.8	-
PVA-A2	نمونه بتنی با PVA	4	2	5.6	40	91.8	-	7.1	16.4	-
PVA-D1	نمونه بتنی با PVA	2.3	3	3.7	19.9	53.4	-	5.4	14.4	-
PVA-D2	نمونه بتنی با PVA	4	3	7	54.3	113.7	-	7.7	16.1	-
PP-E1	نمونه بتنی با PP	2.3	2	0.63	5.2	12.4	-	8.3	19.7	-
PP-E2	نمونه بتنی با PP	4	2	2.2	16.8	43.5	-	7.4	19.3	-
PP-B1	نمونه بتنی با PP	2.3	3	1.9	6.2	29	-	3.3	15.3	-
PP-B2	نمونه بتنی با PP	4	3	2.6	28.4	41.5	-	11.1	16.2	-
NC-C1	نمونه بتنی معمولی	2.3	-	0.2	-	-	-	-	-	-
NC-C2	نمونه بتنی معمولی	4	-	0.5	-	-	-	-	-	-
PVA -A2-REC	نمونه بتنی با PVA	4	2	7	37.3	84.4	-	5.3	12	-
PVA -D2-REC	نمونه بتنی با PVA	4	2	16.7	71.2	175.2	-	4.3	10.5	-
PP-E2-REC	نمونه بتنی با PP	4	3	6.4	15.3	34.4	124.2	2.4	5.3	19.3
PP-B2-REC	نمونه بتنی با PP	4	3	9.5	41.8	132.3	311.6	4.4	13.9	7.4



شکل ۸ نمودار بار- تغییرمکان نمونه PVA-A1



شکل ۹ نمودارهای بار- تغییرمکان نمونه‌های مربعی ۳۰×۳۰ با ضخامت ۲,۳ سانتی‌متر



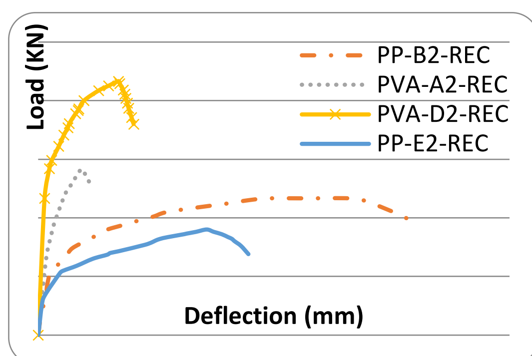
شکل ۱۰ نمودارهای بار-تغییرمکان نمونه‌های مربعی ۳۰×۳۰ با ضخامت ٤ سانتی‌متر

در اکثر نمونه‌ها تطابق بیش از ۹۷ درصدی بین نتایج دو نمونهٔ مشابه وجود دارد لذا نمودار متوسط هر دو نمونه مشابه محاسبه گردیده است و سپس منحنی بار- تغییرمکان کلیه نمونه‌ها با دو و سه درصد الیاف پلی‌وینیل الکل و پلی‌پروپیلن به‌همراه نمونهٔ بتن معمولی در شکل شمارهٔ (۹) با هم مقایسه شده‌اند. به‌همین ترتیب، در ابتدا نمونه‌های معمولی و الیافی بتنی با ضخامت ٤ سانتی‌متر دوبه‌دو با هم مقایسه شده‌اند و پس از مشاهدهٔ کمتر از ۳ درصد اختلاف، کلیه منحنی‌های متوسط در شکل (۱۰) با هم نشان داده شده‌اند.

به‌منظور بررسی و مشاهدهٔ عینی تغییرات حاصل از افزودن الیاف PVA و PP، دو نمونه بتن معمولی با ضخامت برابر ساخته شدند. طی آزمایش مشاهده گردید که هر دو نمونهٔ بتنی معمولی با ضخامت ۲,۳ سانتی‌متر (NC-C1) با اعمال حداقل ۰,۸۳ کیلونیوتن گسیخته شدند؛ ازاین‌رو، میزان جذب انرژی در این نمونه‌ها قابل صرفنظر کردن می‌باشد. در شکل (۱۱) نمودارهای بار- تغییرمکان نمونه‌های مستطیلی ۶۰×۱۵ سانتی‌متری با ضخامت ٤ سانتی‌متر حاوی میزان ۲ و ۳ درصد الیاف PVA و PP نشان داده شده است. در شکل (۹)، حداکثر نیروی تحمل‌شده توسط نمونهٔ PVA-D1 نسبت‌به نمونه‌های PVA-A1 و PP-B1، به‌ترتیب ٤١,١ و ۷۰ درصد بیشتر می‌باشد. PP-E1 تحمل کرده است که این امر مبین آن است که در نمونه‌های بتنی حاوی الیاف PP، نمونهٔ PP-B1 صرفا چهار درصد نیروی بیشتری نسبت‌به نمونه‌های حاوی الیاف PP با ضخامت کم جذب کرده است؛ ازاین‌رو، افزایش الیاف تأثیر فزاینده‌ای در بهبود باربری نمونه‌ها نمی‌نماید. درصورتی‌که در نمونه‌های مسلح به الیاف PVA با افزایش میزان الیاف، میزان باربری نمونه‌ها به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است. همچنین میزان جذب انرژی در نمونه‌های PVA-D1 نسبت‌به PP-B1، ٦٢ درصد بیشتر می‌باشد. با افزایش میزان الیاف در نمونه‌های بتنی مسلح با الیاف پلی وینیل الکل از دو درصد به سه درصد، میزان جذب انرژی ۷۰ درصد افزایش یافته است و این درحالی است که افزایش میزان الیاف در نمونه‌های مسلح به الیاف پلی پروپیلن تأثیر زیادی در بهبود جذب انرژی نمونه‌ها نداشته است.

باتوجه به موارد فوق، نتیجه می‌گردد که میزان باربری و جذب انرژی در نمونه‌های بتن الیافی مسلح به الیاف پلی وینیل الکل نسبت‌به نمونه‌های الیافی پلی پروپیلن با ضخامت کم، بیشتر می‌باشد و با افزودن میزان الیاف بیشتر به ماتریس بتن این تأثیرات چشمگیرتر می‌گردد. مطابق شکل (۱۰)، حداکثر نیروی تحمل‌شده توسط نمونهٔ PVA-D2 نسبت‌به نمونه‌های PVA-A2 و PP-B2 ، به‌ترتیب ۱۰ و ۲۸ درصد بیشتر می‌باشد. در نمونه‌های حاوی الیاف PP، نمونهٔ PP-B2، ۲۸ درصد نیروی بیشتری نسبت‌به PP-E2 تحمل کرده است. همچنین میزان جذب انرژی در نمونه‌های PVA-D2 نسبت‌به PP-B2 تقریبا ۳ درصد بیشتر می‌باشد. با افزایش میزان الیاف در نمونه‌های بتنی مسلح با الیاف پلی وینیل الکل از دو درصد به سه درصد، میزان جذب انرژی ۳۹ درصد افزایش یافته است و این درحالی است که افزایش میزان الیاف در نمونه‌های مسلح به الیاف پلی پروپیلن با ضخامت ٤ سانتی‌متر، ۳٤ درصد میزان جذب انرژی را افزایش داده است. باتوجه به موارد ذکرشده، نتیجه می‌گردد که افزایش ضخامت در نمونه‌ها به‌نحو چشمگیری در بهبود ظرفیت باربری و میزان جذب انرژی نقش داشته است. همچنین مشاهده می‌گردد که افزایش میزان الیاف در نمونه‌های مسلح به الیاف PP با ضخامت زیاد تأثیر چشم‌گیری داشته است؛ به‌طوری‌که اختلاف ظرفیت باربری و میزان جذب انرژی که در نمونه‌های PVA-D1 نسبت‌به PP-B1 به‌ترتیب برابر ۷۰ و ٦۲ درصد بوده است، در نمونه‌های PVA-D2 نسبت‌به PP-B2 به‌مقدار ۲۸ و ۳ درصد تقلیل یافته است که این امر مؤید آن است که در نمونه‌های با ضخامت بیشتر عملکرد نمونه‌های بتنی مسلح به الیاف PP نیز مطلوب می‌باشد.

مطابق شکل (۱۱)، حداکثر نیروی تحمل‌شده توسط نمونهٔ PVA-D2-REC نسبت‌به نمونه‌های PVA-A2-REC و PP-B2-REC، به‌ترتیب ٥٤ و ۸۷ درصد بیشتر می‌باشد. در نمونه‌های حاوی الیاف PP، نمونهٔ PP-B2-REC، ۲۹ درصد نیروی بیشتری نسبت‌به PP-E2-REC تحمل کرده است.



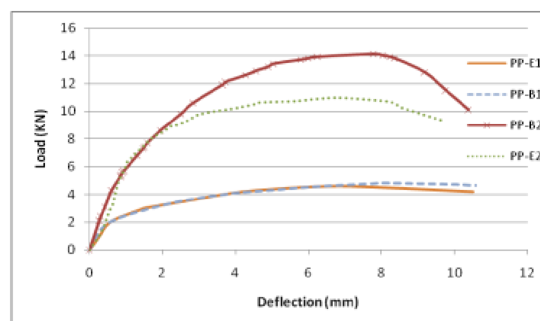
شکل ۱۱ نمودارهای بار– تغییرمکان نمونه‌های مستطیلی ٦۰×۱٥ با ضخامت ٤ سانتی‌متر

همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش میزان الیاف در بتن، میزان باربری نمونه‌ها را به‌طور چشم‌گیری افزایش داده است. همچنین میزان جذب انرژی در نمونه‌های PP-B2-REC نسبت‌به نمونه‌های PVA-D2-REC تقریبا دو برابر شده است. با افزایش میزان الیاف در نمونه‌های بتنی مسلح با الیاف پلی وینیل الکل از دو درصد به سه درصد، میزان جذب انرژی تقریبا ۲/۲ برابر شده است و این درحالی است که افزایش میزان الیاف در نمونه‌های مسلح به الیاف پلی پروپیلن از دو درصد به سه درصد، میزان جذب انرژی ۱/٥ برابر گشته است. باتوجه به موارد فوق، نتیجه می‌گردد که در نمونه‌های مستطیلی تغییرات حاصل از افزایش میزان الیاف در نمونه‌ها بسیار زیاد می‌باشد که این امر در نمونه‌های مسلح به الیاف PP به‌طور قابل ملاحظه‌ای مشهود می‌باشد. در شکل (۱۲) نمودار بار– تغییرمکان نمونه‌های مربعی ۳۰×۳۰ مسلح به الیاف PP و PVA با ضخامت‌های ۲،۳ و ٤ سانتی‌متر نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص می‌باشد افزایش ضخامت تأثیر زیادی در بهبود ظرفیت باربری نمونه‌ها داشته است. همچنین واضح است که افزایش میزان الیاف در نمونه‌های با ضخامت کم تأثیر

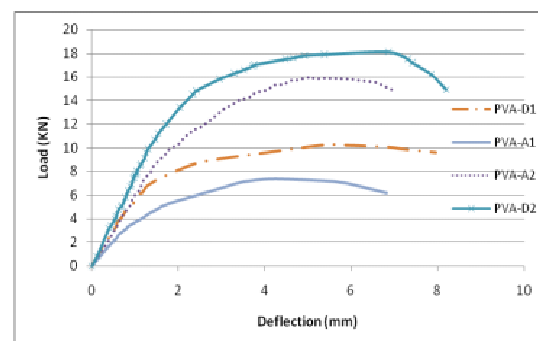
فزاینده‌ای نداشته است؛ درحالی‌که در نمونه‌های با ضخامت بیشتر، تأثیر افزودن الیاف به‌طور قابل ملاحظه‌ای مشهود می‌باشد.

در شکل (۱۳) نمودار ممان- تغییرمکان نمونه‌های مربعی و مستطیلی مسلح به الیاف پلی پروپیلن و PVA با ضخامت ٤ سانتی‌متر نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص می‌باشد، حداکثر ممان تحمل‌شده توسط نمونه‌های مستطیلی درمقایسه با نمونه‌های مربعی بیشتر می‌باشد. همچنین واضح است که افزایش میزان الیاف در بهبود عملکرد نمونه‌های بتنی مسلح به الیاف پلی پروپیلن (نمونه‌های مربعی و مستطیلی) نقش مطلوبی داشته است.

با استفاده از نمودارهای بار- تغییرمکان و انتگرال‌گیری از سطح زیر منحنی، مقادیر جذب انرژی محاسبه می‌گردد.

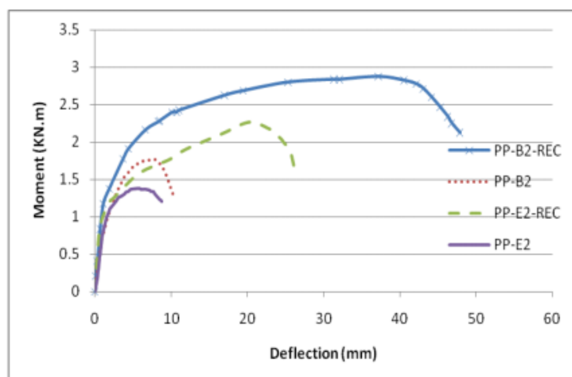


الف - الیاف PP

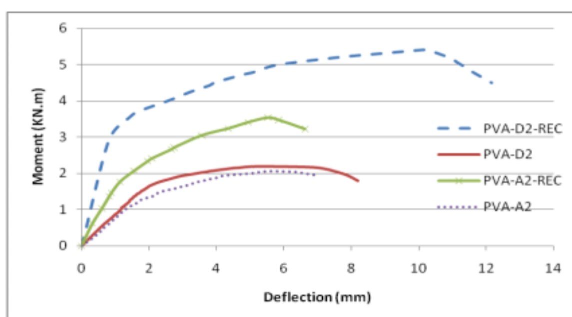


ب - الیاف PVA

شکل ۱۲ نمودارهای بار- تغییرمکان نمونه‌های مربعی مسلح به الیاف PP و PVA با ضخامت‌های ۲،۳ و ٤ سانتی‌متر



الف - الیاف PP

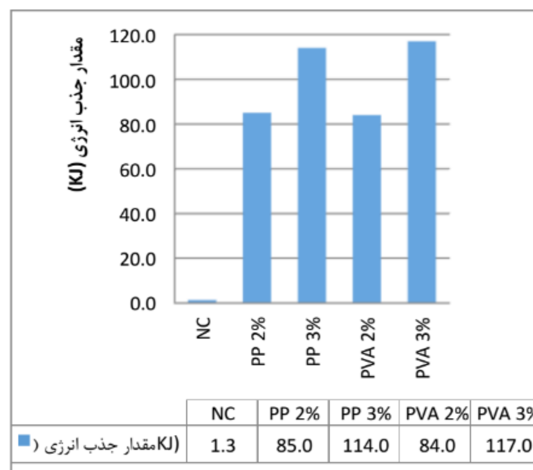


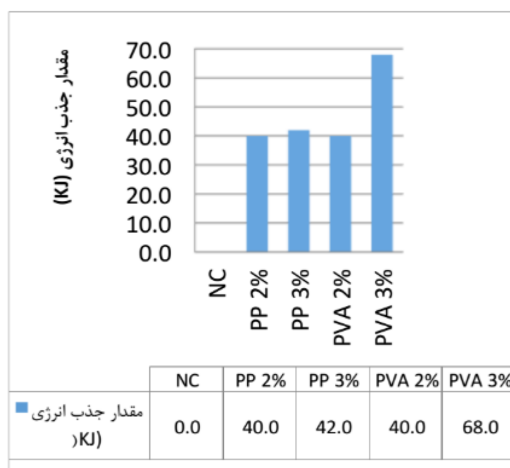
ب - الیاف PVA

شکل ۱۳ نمودار ممان- تغییرمکان نمونه‌های مربعی و مستطیلی مسلح به الیافPP و PVA با ضخامت ٤ سانتی‌متر

در شکل‌های (١٤ تا ١٦) میزان جذب انرژی در نمونه‌های مختلف اعم از نمونه‌های مربعی و مستطیلی با ضخامت‌های مختلف و نیز به‌طور خاص مقادیر جذب انرژی در نمونه‌های مربعی مسلح به الیاف PP و PVA ارائه شده است. مقایسه بین نمودارها نشان می‌دهد که ظرفیت بار نمونهٔ حاوی ۳ درصد الیاف PVA تقریبا ۳۰ درصد بیشتر از نمونهٔ حاوی ۳ درصد الیاف PP می‌باشد، درحالی‌که به‌دلیل تغییرمکان‌های بیشتر در نمونهٔ PP 3%، مقدار جذب انرژی در هر دو نمونه تقریبا برابر به‌دست آمده است. طاقت عبارت است از مشخصهٔ جذب انرژی مصالح که نمایانگر قابلیت مقاومت مصالح دربرابر گسیختگی تحت بارهای استاتیکی، دینامیکی یا ضربه می‌باشد. مطابق استاندارد ASTM-C1018 به‌منظور بررسی رفتار و عملکرد نمونه‌ها، اندیس‌های طاقت برای

نمونه‌های مورد آزمایش مطابق جدول (٩) تعیین گردید. اگر تغییرمکان نمونه در لحظهٔ ایجاد اولین ترک برابر δ باشد به‌ترتیب سطح زیر منحنی بار- تغییرمکان تا ٣δ، ٥/٥δ، ١٠/٥δ، ١٥/٥δ، ٢٥/٥δ و ٥٠/٥δ تقسیم بر سطح زیر منحنی بار- تغییرمکان تا اولین ترک (δ) را اندیس‌های I5، I10، I20، I30، I50، I100 نشان می‌دهند. از اندیس‌های پایین‌تر، برای مقایسهٔ رفتار و میزان نسبت جذب انرژی در تغییرمکان‌های کوچک و از اندیس‌های بالاتر برای مقایسهٔ رفتار نمونه‌ها در تغییرمکان‌های بزرگ استفاده می‌گردد.

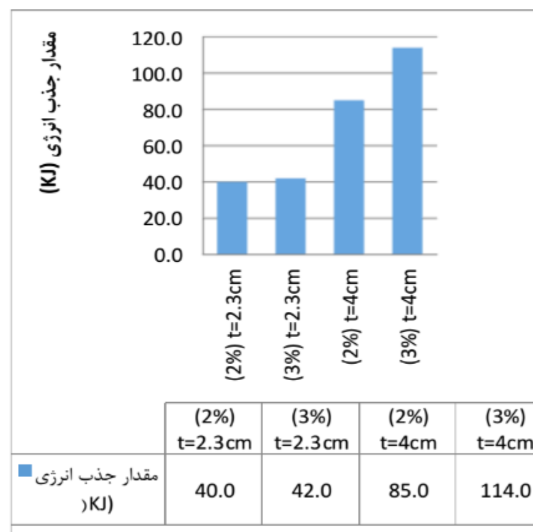


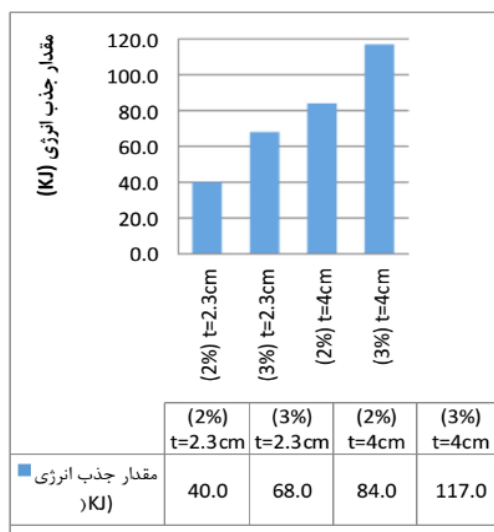


الف- ضخامت ٢,٣ سانتیمتر

ب- ضخامت ۴ سانتیمتر

شکل ١٤ میزان جذب انرژی در نمونه‌های مربعی

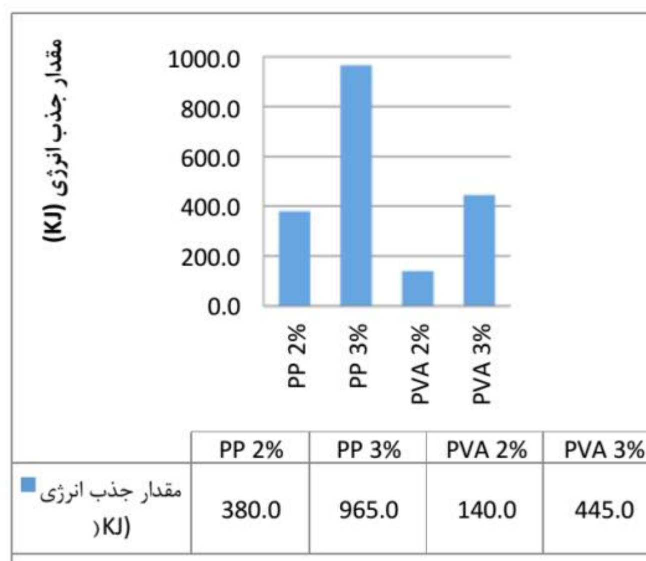




الف - الیاف PVA

ب- الیاف PP

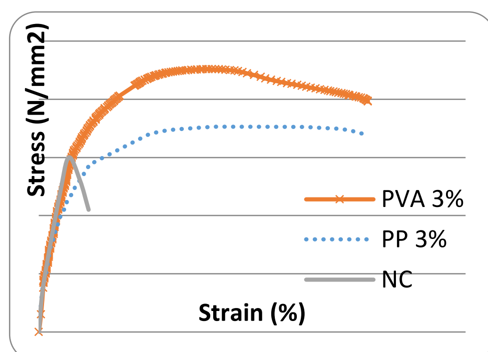
شکل ١٥ میزان جذب انرژی در نمونه‌های مربعی مسلح به الیاف



شکل ۱۶ میزان جذب انرژی در نمونه‌های مستطیلی با ضخامت ٤ سانتی‌متر

افزایش ضخامت در نمونه‌ها به‌نحو چشم‌گیری در بهبود ظرفیت باربری و میزان جذب انرژی نقش داشته است. همچنین مشاهده می‌گردد که افزایش میزان الیاف در نمونه‌های مسلح به الیاف PP با ضخامت زیاد تأثیر چشم‌گیری داشته است، به‌طوری‌که اختلاف ظرفیت باربری و میزان جذب انرژی که در نمونه‌های PVA-D1 (نمونه با ضخامت ۲٫۳ سانتی‌متر دارای ۳٪ الیاف PVA) نسبت‌به PP-B1 (نمونه با ضخامت ۲٫۳ سانتی‌متر دارای ۳٪ الیاف PP) به‌ترتیب برابر ۷۰ و ٦۲ درصد بوده است؛ در نمونه‌های PVA-D2 (نمونه با ضخامت ٤ سانتی‌متر دارای ۳٪ الیاف PVA) نسبت‌به PP-B2 (نمونه با ضخامت ٤ سانتی‌متر دارای ۳٪ الیاف PP) به‌مقدار ۲۸ و ۳ درصد تقلیل یافته است که این امر مؤید آن است که در نمونه‌های با ضخامت بیشتر عملکرد نمونه‌های بتنی مسلح به الیاف PP نیز مطلوب می‌باشد.

منحنی تنش-کرنش نمونه‌های فشاری. به‌منظور بررسی رفتار نمونه‌های بتنی مسلح به الیاف پلی وینیل الکل و پلی پروپیلن، نمونه‌های استوانه‌ای ۱۰×۲۰ تهیه گردید که پس از ۲۸ روز این نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گرفتند؛ به‌طوری‌که با اعمال نیروی فشاری توسط دستگاه تست فشار، تغییرمکان‌های به‌دست‌آمده توسط ابزار تغییرمکان سنج (LVDT) اندازه‌گیری و نتایج توسط دستگاه ثبت دیجیتال (Data logger) ثبت گردید. نتایج به‌دست‌آمده در قالب نمودارهای شکل (۱۷) ارائه گردیده است.



شکل ۱۷ نمودار تنش-کرنش نمونه‌های بتنی معمولی و مسلح به الیاف PVA و PP

همان‌طور که در شکل (۱۷) مشخص می‌باشد، افزودن الیاف به بتن تأثیر بسیار مطلوبی در رفتار و عملکرد نمونه‌ها داشته است که این امر در نمونه‌های مسلح به الیاف پلی وینیل الکل بیشتر مشهود می‌باشد. مطابق شکل، کرنش بتن معمولی (NC) در نقطه حداکثر بار، برابر

۰٫۰۰۲ و کرنش نهایی گسیختگی برابر ۰٫۰۰۳۵ می‌باشد. در حالی که در نمونه‌های دارای الیاف PVA و PP، کرنش متناظر با حداکثر بار، تقریبا برابر ۰٫۰۰۸ است، لیکن کرنش نهایی بیش از ۰٫۰۲ (۲ درصد) می‌باشد که تقریبا شش برابر کرنش نهایی بتن معمولی می‌باشد. مطابق نمودار، کرنش نهایی نمونهٔ مسلح به الیاف PVA تقریبا برابر مقدار کرنش نهایی نمونهٔ دارای الیاف PP می‌باشد درحالی‌که حداکثر بار تحمل‌شده توسط نمونهٔ دارای الیاف PVA متناظر با این نقطه تقریبا ۳۰ درصد بیشتر از مقدار تحمل‌شده توسط نمونهٔ دارای الیاف PP می‌باشد.

نتیجه‌گیری

مشخصات مکانیکی الیاف مصرفی در بتن‌های الیافی توانمند از پارامترهای بسیار مهم در بهبود عملکرد و رفتار بتن می‌باشد. نظر به ویژگی‌های الیاف پلیمری نظیر الیاف‌های پلی وینیل الکل و پلی پروپیلن، این الیاف‌ها هدف بررسی این تحقیق برای پنجاه و شش دال بتنی مسلح قرار گرفت و آزمایش‌های استاتیکی فشاری، خمشی و ضربه‌ای برروی تعداد زیادی از نمونه‌های الیافی و نمونه‌های بتنی معمولی انجام شد که نتایج زیر حاصل گردید:

- افزودن الیاف پلی وینیل الکل و پلی پروپیلن به مخلوط بتن منجر به افزایش قابل ملاحظهٔ ظرفیت باربری، مقاومت کششی و مقاومت ضربه‌ای دال‌های بتنی نمونه‌ها می‌گردد.
- نمونه‌های سادهٔ بتنی فاقد الیاف پس از اولین ضربه به‌صورت ترد گسیخته شدند؛ لیکن اولین ترک‌ها در نمونه‌های ضخامت ٤ سانتی‌متری PVA و PP پس از ۱۸ و ۲ ضربه نمایان شدند و پس از ١٦٣ و ۵۵ ضربه گسیخته شدندو بنابراین مقاومت ضربه‌ای نمونه‌های دارای الیاف PVA تقریبا سه برابر نمونه‌های دارای الیاف PP بود.
- در نمونه‌های بتنی حاوی الیاف PP با ضخامت کم، افزایش الیاف تأثیر فزاینده‌ای در بهبود باربری نمونه‌ها نمی‌نماید؛ درصورتی‌که در نمونه‌های مسلح به الیاف PVA با افزایش میزان الیاف، میزان باربری نمونه‌ها به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است. همچنین میزان باربری و جذب انرژی در نمونه‌های بتن الیافی مسلح به الیاف پلی وینیل الکل نسبت‌به نمونه‌های الیافی پلی پروپیلن با ضخامت کم، بیشتر می‌باشد.
- افزایش ضخامت در نمونه‌ها به‌نحو چشم‌گیری در بهبود ظرفیت باربری و میزان جذب انرژی نقش داشته است. اختلاف ظرفیت باربری بین نمونه‌های ضخیم دو نوع الیاف وجود دارد ولی اختلاف جزئی در میزان جذب انرژی در دو نمونهٔ PVA نسبت‌به PP با الیاف مشابه مشاهده شد.
- افزایش ۵۰ درصدی الیاف PVA در نمونه‌های مستطیلی ٦۰×۱۵ منجر به افزایش ٥٤ درصد نیرو و دو برابری در میزان جذب انرژی شد و نیروی در نمونه PVA با ۳٪ الیاف ، ۸۷ درصد بیش از نیروی در نمونهٔ PP با مقدار الیاف مشابه بود.
- افزودن الیاف PVA و PP به بتن باعث افزایش ٤ برابری کرنش متناظر با حداکثر بار و شش برابری کرنش نهایی گسیختگی (۲ درصد) نمونه‌های استوانه‌ای بتنی الیافی نسبت‌به نمونه‌های بدون الیاف شدند؛ درحالی‌که حداکثر بار تحمل‌شده توسط نمونهٔ PVA حدود ۳۰ درصد بیشتر از مقدار تحمل‌شده توسط نمونهٔ دارای الیاف PP می‌باشد.
- میزان حداکثر بار تحمل‌شده توسط نمونهٔ مسلح به الیاف پلی وینیل الکل در آزمایش بارگذاری استاتیکی از دیگر نمونه‌ها بیشتر می‌باشد که این امر می‌تواند بر مقاومت ضربه‌ای بالا که در آزمایش‌های ضربه رؤیت شد، صحه بگذارد.

مراجع

1. Miyamoto, A., Nakamura, H., "Visualization of Impact Failure Behavior for RC Slabs", *Proceeding of 3rd International Conference on Concrete under Severe Conditions,* UBC, Vancouver, Canada, (2001).
2. Dancygier, A.N., Yankelevsky, D.Z., Jaegermann, Ch., "Response of High Performance Concrete Plates to Impact of Non-deforming Projectiles", *International Journal of Impact Engineering,* 34:1768-1779 (2007).
3. Gu, W., "Performance and Adoption Measures of Concrete Structures Against Load Impacts by Sudden Bombing Attacks", *Proceeding of 3rd International Conference on Concrete under Severe Conditions,* Seoul, Korea, June 27 - July 01, (2004).
4. Zeineddin, M., Krauthammer, T., "Experimental Study of Reinforced Concrete Slabs Subjected to Impact Loading", *Proceeding of 3rd International Conference on Concrete under Severe Conditions,* Seoul, Korea, June 27 - July 01, (2004).
5. Abbas, H., Gupta, N.K., Alam, M., "Nonlinear Response of Concrete Beams and Plates under Impact Loading", *International Journal of Impact Engineering,* Vol. 30, pp. 1039-1053, (2004).
6. Thabet, A., Haldane, D. , "Three-Dimensional Simulation of Nonlinear Response of Reinforced Concrete Members Subjected to Impact Loading", *ACI Structural Journal,* Vol. 97, No.5, pp. 689-702, (2000).
7. Low, H.Y. , Hao, H. , "Reliability Analysis of reinforced Concrete Slabs under Explosive Loading" , *Structural Safety,* Vol. 23, pp. 157-178, (2001).
8. Zhang, J., Leung, Ch. K.Y., Cheung, Y.N., "Flexural Performance of Layered ECC-concrete Composite Beam", Vol.66, pp.1501-1512, (2006).
9. Kim, Y.Y., Fischer, G., Lim, Y.M. and Li, V.C., "Mechanical Performance of Sprayed Engineered Cementitious Composite Using Wet Mix Shotcreting Process for Repair Applications", Vol. 101, NO. 1, pp. 42-49. (2004).
10. Zhang, J., Maalej, M. and Quek, S.T., "Hybrid Fiber Engineered Cementitious Composites (ECC) for Impact and Blast-resistant Structures", *Proceedings of the First International Conference on Innovative Materials and Technologies for Construction and Restoration– IMTCR04,* Vol 1, pp. 136-149. Lecce, Italy, June (2004).
11. Maalej, M., Quek, S.T. and Zhang, J., "Behavior of Hybrid-fiber Engineered Cementitous Composites Subjected to Dynamic Tensile Loading and Projectile Impact", ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 17, No. 2 – April (2005).
12. Shao, Y. and Jiang, L., 'Freeze-Thaw Resistance of High Performance Fiber Reinforced Concrete', Proceedings of the *Third* International Conference on Concrete under Severe Conditions, CONSEC 3, Vancouver, Canada, (2001).

13. Leung, Ch.K.Y. , Cheung, Y.N., Zhang, J., "Fatigue Enhancement of Concrete Beam with ECC Layer", Cement and Concrete Resear*ch*, Vol. 29, No. 6, pp.456-473, (2007).
14. Ogawa A, Hitomi Y, Hoshiro H , "PVA-fiber reinforced high performance cement board." , Proceedings of international RILEM workshop on HPFRCC in structural applications, pp 243–251 (2006).
15. Li, Q. M. , Reid, S. R. , Wen, H. M. , Telford , A. R., "Local Impact Effects of Hard Missle on Concrete Targets", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, (1-4): pp. 224-84 (2006).
16. Nataraja, M.C., Dhang, N., Gupta, A.P., "Statistical Variation in Impact Resistance of Steel-Fiber Reinforced Concrete Subjected to Drop Weight Test", *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 989-995, (1999).
17. Banthia, N., Bindiganavile, V., "Fiber Reinforced Cement based Composites under Drop Weight Impact Loading: Test Equipment & Material Influences", *ACI Special Publication*, Vol. 206, pp. 411-428, (2002).
18. ACI-American Concrete Institute, 544 Committee report on Fiber Reinforced Concrete, (1999).
19. Banthia, N., Bindiganavile, V., "Machine Effects in the Drop Weight Impact Testing of Plain Concrete Beams", *Proceeding of 3rd International Conference on Concrete under Severe Conditions*, UBC, (2001).
20. Badr, A., Ashour, A. F., "Modified ACI Drop Weight Impact Test for Concrete", *ACI Material Journal*, Vol. I02, No.4, (2005).
21. Zhang, J., Maalej, M., Quek, S.T. and Teo, Y.Y., "Drop weight impact on hybrid-fiber ECC blast/shelter panels", *Proceeding of 3rd International Conference on construction material*, performance, innovation, and structural application, Vancouver, Canada, (2005).